

하천수정화 연못-습지 시스템의 갈대 습지셀 초기 질산성질소 제거

양홍모

전남대학교 조경학과

(2002년 11월 6일 접수, 2002년 11월 29일 수리)

Nitrate Removal Rate in Reed Wetland Cells of a Pond-Wetland Stream Water Treatment System

Hong-mo Yang (Dept. of Landscape Architecture, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea)

ABSTRACT : Nitrate removal rate in three wetland cells was examined. The acreage of each cell was 150 m². They were a part of a stream water treatment demonstration system which was composed of two ponds and six wetland cells. Earth works for the pond-wetland system were finished from April 2000 to May 2000 and reeds were planted in the three cells in May 2001. Waters of Sinyang Stream flowing into Kohung Estuarine Lake located southern coastal area of Korean Peninsula were pumped into a primary pond. Effluents from a secondary pond were funneled into the three cells. Volumes and water quality of inflow and outflow were analyzed from July 2001 through December 2001. Inflow and outflow averaged 20 m³/d and 19.3 m³/d, respectively. Hydraulic retention time was 1.5 days. Average influent and effluent nitrate concentration was 2.30 mg/L, 1.75 mg/L, respectively. Nitrate removal rate in the three cells averaged 80.9 mg/m²/day. Seasonal changes of nitrate retention rates were closely related to those of wetland temperatures. Full growth of reeds within a few years can develop litter-soil substrates beneficial to the denitrification of nitrate, which may lead to increases of the nitrate retention rates.

Key words: nitrate, wetland, water treatment system.

서 론

인공습지는 수질을 정화하기 위해 인위적으로 조성한 습지로 자연습지의 자연생태적 수질정화 기능을 활용한다. 수질정화 측면에서 1차처리 수준으로 정화된 하수를 2차처리 수준으로 정화하기 위해 조성한 습지를 일반적으로 인공습지 (constructed wetlands)라고 부른다. 2차처리 수준으로 정화된 하수를 3차처리 수준으로 정화하기 위해 조성한 습지를 인공습지와 구별하여 마무리습지(polishing wetlands) 혹은 개선습지(enhancement wetlands)라고 부르기도 한다¹⁾.

유입수의 BOD의 농도가 높은 경우 인공습지는 질소, 인의 제거 보다는 BOD 제거를 목적으로 설계하며, BOD 부하량이 인공습지 설계의 주요 인자가 된다. 최근 들어 오염농도가 상대적으로 낮은 하천수, 2차처리장 방류수, 강우 유출수 등을 정화하기 위해 인공습지를 활용하고 있으며, 이 경우 BOD

제거보다는 질소와 인 제거가 인공습지 조성의 주목적이 되며 질소 부하량이 중요한 설계인자가 된다.

개선습지 유형의 인공습지는 수질정화 이외에 야생동물서식처, 자연학습공간, 시민휴식공간, 습지복원 등 친환경적 기능을 제공할 수 있는 장점이 있으며²⁾, 최근 선진국에서는 이들 기능을 고려하여 개선습지를 설계하는 추세이다.

인공습지는 질소제거에 효율적인 대안으로 활용되고 있으며, 기계식 3차처리 공정보다 건설비와 운영비가 적게 소요되는 장점이 있다. 인공습지에서 질소는 암모니아화-질산화-탈질화에 의해 제거되거나, 습지식물의 흡수로 제거된다. 인공습지에서 제거되는 질소의 총량에서 탈질화에 의해서 제거되는 양이 약 60~70%에 이르며, 습지식물에 의해 제거되는 양은 약 25% 정도이다^{3,5)}. 식물에 의해 흡수된 질소는 식물이 죽어 유기 쇄설물이 되면 습지로 다시 용출될 가능성이 있으나, 탈질화 작용으로 질산태 질소(NO₃-N)가 질소가스로 전환되면 질소가스가 습지로부터 대기 중으로 이동한다. 습지에서 탈질화작용이 활발하게 이루어지면 질소제거가 상대적으로 높아지게 된다. NO₃-N의 제거량으로 습지의 탈질화 정도를 알 수

*연락처:

Tel: +82-62-530-2101 Fax: +82-62-530-2109

E-mail: hmy@chonnam.ac.kr

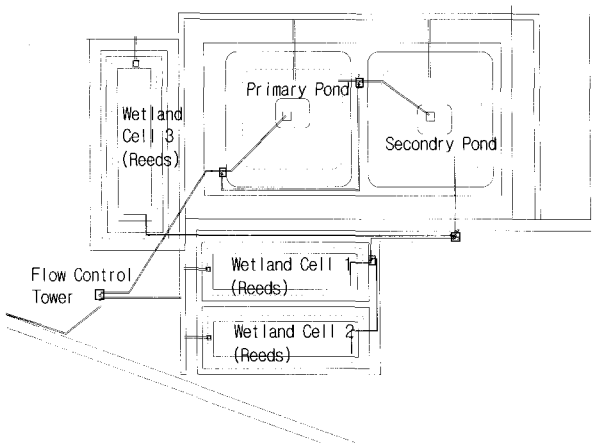


Fig. 1. Schematic layout of pond-wetland system for stream water treatment

있으며, 유입수의 질소 중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 차지하는 비율이 높을수록 질소 제거율이 높아지게 된다.

시화호의 담수화 포기의 영향으로, 조성이 완료된 담수호 및 앞으로 조성될 새만금지구 담수호의 수질에 대한 우려가 높아지면서, 담수호로 유입되는 하천수를 정화하는 인공습지 활용방안에 관심이 고조되고 있다. 본 연구는 담수호의 수질 개선을 위해 담수호로 유입되는 하천수를 정화하는 연못-습지 시스템 모델개발을 위해 조성한 연못-습지 시스템의 갈대습지 셀의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 초기 제거율을 조사분석하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

습지셀 구조

수질정화 연못-습지 시스템을 전라남도 고흥군 고흥담수호 유입부의 신양천변 개답지역 상류부 포락지에 조성하였다. 연못-습지 시스템은 연못 2개와 습지셀 6개로 구성되어 있다⁶⁾. Fig. 1은 2개의 연못과 본 연구대상인 습지 셀 3개를 보여준다. 2000년 4월부터 7월 초에 시스템 토공을 완료하고, 본 연구 습지셀 3개는 2001년 4월~5월에 시스템 주변에서 자생하는 갈대를 채취하여 식재하였다. 고흥담수호로 유입되는 신양천 하천수를 펌핑으로 1차연못에 유입시킨후 1차연못의 처리수가 자연유하로 2차연못으로 유입되며, 2차연못의 처리수가 각 습지 셀로 분산 유입된다⁷⁾.

Fig. 1에서 습지 셀은 자유수면 습지로 조성하였다. 유입관을 통해 2차연못의 유출수가 습지 셀로 유입되며, 유출부는 수문(weir)를 설치하여 수심 60 cm까지 조절할 수 있다. 각 습지 셀의 바닥면적은 약 150 m^2 (6 m x 25 m) 이다. 실험기간 습지 셀의 유입량과 유출량은 각각 $20 \text{ m}^3/\text{day}$, $19.3 \text{ m}^3/\text{day}$ 였으며 체류시간은 약 1.5일이었다.

조사 및 분석 방법

습지에 식재한 갈대의 활착을 유도하기 위해 2001년 6월 말까지 낮은 수심을 유지한 후 2001년 7월부터 습지의 수심

을 약 0.3 m가 유지되도록 조절하였다 2001년 7월부터 12월 까지 습지의 초기 처리수준을 분석하였다. 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 샘플링하여 수질 오염공정시험방법⁸⁾을 기준으로 TN, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 등을 분석하였다. 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 인공습지의 유입량 및 유출량은 매일 1~2회 유입부와 유출부에서 1분 동안 흐르는 유입량과 유출량을 3회 받아서 평균 유입량 및 유출량을 산출하였다. 유입 및 유출수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도, 유입량, 유출량, 습지면적을 기초로 습지의 초기 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 TN 제거율을 산출하였다.

결과 및 고찰

조사기간 습지셀 3개의 유입수와 유출수의 평균 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 각각 2.30 mg/L, 1.75 mg/L 이었다. 유입수와 유출수 $\text{NO}_3\text{-N}$ 부하율은 각각 $306.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$, $225.7 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 이었다. 습지 셀의 평균 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거율은 $80.9 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 였다(Table 1). 제거량을 기준으로 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 평균 제거율은 약 26%이다. 습지 셀의 유입수와 유출수의 평균 TN 농도는 각각 3.92 mg/L, 3.1 mg/L 이었으며, TN 제거율은 $122.7 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 를 나타냈다. 습지셀 유입수의 TN에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 차지하는 비율은 약 58%이다. 유입수의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 와 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도는 0.1 mg/L 이하로 나타나 무시할 수 있는 수준이었다.

인공습지의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거율은 6~4000 $\text{mg/m}^2/\text{day}$ 범위이다. 115개 인공습지가 질소정화를 목적으로 북미에서 운영중이며, 51개 인공습지의 평균 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거율이 $125 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 이며, 37개 인공습지의 평균 TN 제거율이 $513 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 이다⁹⁾. 이들 인공습지는 조성 후 수년이 경과한 습지들이다. 본 연구습지의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거율 $80.9 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 는 이들 습지보다 낮은 편이다. 본 연구습지가 조성 후 초기단계이고, 수온이 낮은 11월 및 12월의 제거율이 평균 제거율에 포함되어 있는 점을 고려하면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거율이 나쁜 편은 아니다.

습지식물의 뿌리와 근경은 미생물이 자랄 수 있는 환경을 제공한다. 정수식물의 통기조직은 대기중의 산소를 뿌리로 전달하고 토양에서 발생하는 질소와 아산화질소를 대기중으로 이동시키는 역할을 한다. 산소가 뿌리에 도달하면 뿌리주변에 엷은 호기상태의 근권이 형성되며, 근권에서 암모니아화와 질산화가 일어난다. 근권을 둘러싸고 있는 혐기성 토양층에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 질소와 아산화질소로 전환되어 습지식물의 통기조직을 통하여 대기중으로 이동한다¹⁰⁾.

질소 부하량과 질소의 형태가 질소제거에 영향을 미친다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 토양으로 확산되어 혐기층의 탈질화 작용으로 제거된다. 유기태 질소는 암모니아화와 질산화과정을 거쳐 $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 전환된다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 높으면 질소제거율이 높아지며, 유기태 질소의 농도가 높을 경우 처리수의 질소 농도가 오히려 높아지는 경우도 있다¹¹⁾.

탈질화는 유기물의 공급이 필요하다¹²⁾. 습지식물이 죽어 습지바닥에 쌓인 잔재물은 유기 쇄설물이 되어 탈질화에 필

Table 1. Average hydraulic and nitrate loading and nitrate removal rate for the reed Wetland cells from July through December 2001

Parameters	Value
Approximate area(m ²)	150
Inflow(m ³ /d)	20
Inflow NO ₃ -N Concentration(mg/L ¹)	2.30
Inflow NO ₃ -N Loading(mg NO ₃ -N/m ² /day)	306.6
Outflow(m/d)	19.3
Outflow NO ₃ -N Concentration(mg/L)	1.75
Outflow NO ₃ -N(mg NO ₃ -N/m ² /day)	225.7
NO ₃ -N Removal Rate(mg NO ₃ -N/m ² /day)	80.9
NO ₃ -N Removal by Mass(%)	26

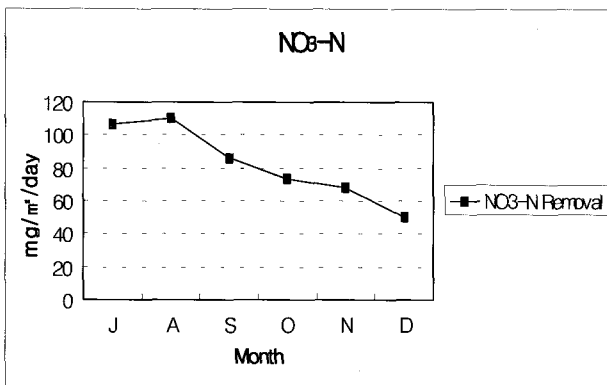


Fig. 2. Monthly average nitrate removal rate in wetland cells

요한 탄소공급원이 된다. 새로 조성한 인공습지는 잔재물토양 (litter-soil)층이 형성되지 못하여 NO₃-N의 제거율이 낮은 경향을 보인다. Zhu and Sikora¹³⁾의 연구에 의하면 NO₃-N의 제거율이 14~30%인 인공습지에 유기물을 추가로 공급하면 제거율이 55~70%로 증가하였다. 새로 조성한 습지에 볏짚을 공급하면 탈질화가 높아지게 된다¹⁴⁾. 본 연구습지는 갈대 식재 후 초기단계로 근권의 발달이 느리고 탈질화에 필요한 유기물 공급이 적어 NO₃-N의 제거효율이 다소 낮은 것으로 사료된다. 갈대가 2~3회 성장기를 거치면 NO₃-N 제거율이 높아질 것으로 사료된다. 탈질화는 체류시간이 길수록 높아지는 경향이 있다. 인공습지의 적정 체류시간으로 5~14일을 제시하고 있다^{15,16)}. 본 인공습지의 체류시간 1.5일은 낮은 범위에 속한다.

Fig. 2는 월별 평균 NO₃-N 제거율을 나타낸다. NO₃-N 제거율은 8월에 109.7 mg/m²/day에 도달하였다가 12월에는 50.1 mg/m²/day로 급격히 낮아졌다. Fig. 4는 유입수와 유출수의 월별 평균온도를 나타낸다. Fig. 2와 Fig. 3에서 월별 평균 NO₃-N 및 TN 제거율의 계절별 변화는 Fig. 4의 월별 유출수 수온의 변화 양상과 비슷하다. 습지의 수온이 NO₃-N

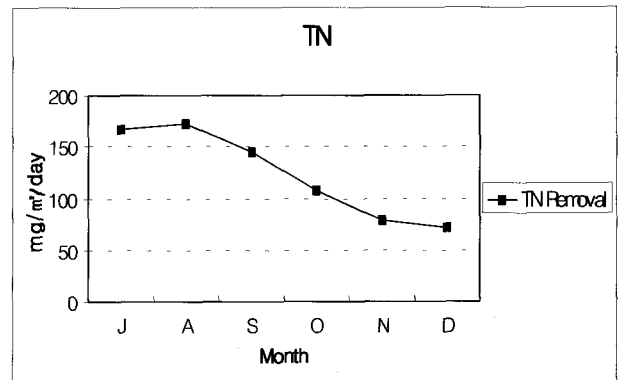


Fig. 3. Monthly average total nitrogen removal rate in wetland cells

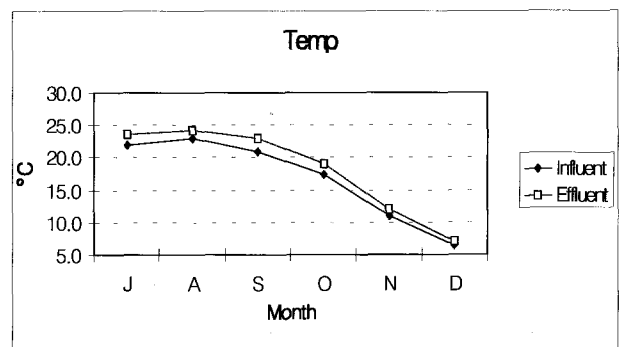


Fig. 4. Monthly average temperature of influent and effluent

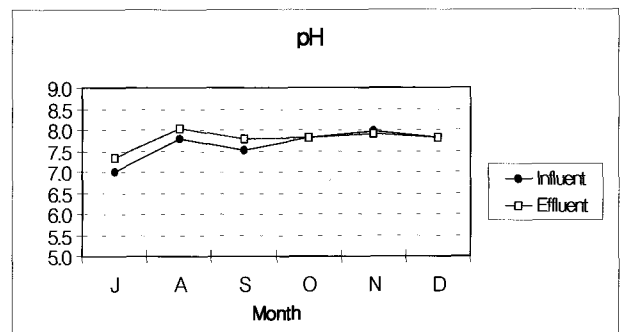


Fig. 5. Monthly average pH of influent and effluent

및 TN 제거율에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 질소제거 효율은 20~25°C에서 높으며, 15°C 이하와 30°C 이상에서는 질산화 및 탈질화 박테리아의 활동이 둔화되어 질소 제거율이 낮아지게 된다. 5°C 이하에서도 탈질화가 일어난다는 연구가 있다¹⁷⁾. 조사기간 인공습지의 월별 유출수의 평균수온은 7월과 8월에 각각 23.6°C, 24.2°C, 9월과 10월에 각각 23°C, 19.2°C, 11월과 12월에 각각 11.9, 6.1°C였다. Fig. 4에서 습지 유출수의 온도가 유입수보다 약간 높다. 본 연구습지의 다소 낮은 NO₃-N 제거율은 11월과 12월의 낮은 수온에도 원인이 있는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 유입수와 유출수의 pH 농도를 보여준다. 탈질화

는 pH 6.0 이하와 pH 8.0 이상에서 낮아지며 pH 7.0~7.5에서 높아 진다¹⁸⁾. 본 연구기간의 습지 pH는 7.3~8.1로 탈질화에 양호한 범위였다. Fig. 5에서 7월부터 9월까지의 습지 유출수의 pH가 다소 높으며 10월부터 12월까지의 유출수와 유입수의 pH 수준이 거의 같다. 7월부터 9월 사이에 습지 유출수의 pH가 높은 원인은 습지 일부에 녹조가 성장한데 원인이 있는 것으로 사료된다. 수중에 녹조가 성장하면 pH가 증가하게 된다¹⁹⁾

요 약

담수호로 유입되는 하천수를 정화하는 연못-습지 시스템의 일부를 구성하는 갈대 습지 셀의 초기 NO₃-N 제거율을 분석하였다. 조사기간 유입수와 유출수의 평균 NO₃-N 농도는 각각 2.30 mg/L, 1.75 mg/L 였으며, 평균 NO₃-N 제거율은 80.9 mg/m²/day 였다. 복미 인공습지의 평균 NO₃-N 제거율 125 mg N/m²/day 보다는 제거율이 낮다. 본 연구습지가 시공 후 초기단계이고 조사기간에 수온이 낮은 11월과 12월이 포함된 것을 고려하면 NO₃-N 제거율은 양호한 편이다. 본 연구습지의 갈대가 2~3년 후 습지를 완전히 덮고, 뿌리주변에 근권이 발달하고, 갈대의 잔재물이 습지바닥에 쌓여 탈질화에 필요한 탄소공급원의 역할을 하면 NO₃-N 제거율이 높아질 것으로 사료된다. 월별 NO₃-N 제거율 변화는 월별 평균 습지 수온의 변화와 유사한 경향을 나타내어 NO₃-N 제거율은 수온에 영향을 받음을 알 수 있다.

습지 셀에 식재한 갈대가 거의 죽지 않고 활착하였으며, 식재 약 3주 후부터 새줄기가 일부 나오기 시작하였다. 유입수가 연못-습지 시스템의 연못을 거치는 동안 총질소에 대한 질산태 질소의 함유비율이 높아져 습지의 질소제거에 도움이 되었다.

본 연구 습지의 유입수 질소 농도는 낮은 수준이다. 초기 연구결과 간척지 담수호 주변에 오염농도가 낮은 담수호의 물이나 담수호 유입하천수를 정화하는 인공습지의 활용이 가능하다고 사료된다.

참고문헌

1. EPA. (1999) Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio.
2. Kadlec, R. and Knight, R. (1996) Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Raton, FL. Kessler, E., Jansson, M., eds. 1994. Wetlands and lakes as nitrogen traps, *Special Issue of Ambio* 23, 319-386.
3. Bartlett, M. S., Brown, L. C., Hanes, N. B. and Nickerson, N. H. (1979) Denitrification in freshwater wetland soil, *J. Environ. Qual.* 8, 460-464.
4. Stengel, E., Carduck, W. and Jebsen, C. (1987) Evidence for denitrification in artificial wetlands. In: Reddy, K. R. and Smith, W. H. Editors, 1987. Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery Magnolia Publishing, Orlando, FL, p.543-550.
5. Cooke, J. G. (1994) Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment, *Water Sci. Technol.* 29, 209-217.
6. 양홍모 (1999) 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템, *한국수자원학회지* 32(5), 111-113.
7. 양홍모 (2002) 담수호 수자원보전을 위한 수질정화 연못-습지 시스템의 초기처리수준, *한국환경복원녹화학회지* 13, 64-71.
8. 환경부. (2000) 수질오염공정시험방법.
9. Bachand, P. A. M. and Horne, A. J. (2000) Denitrification in constructed free-water surface wetlands. I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study, *Ecol. Eng.* 14, 9-15.
10. Faulker, S. P. and C. J. Richardson. (1989) Physical and Chemical Characteristics of Freshwater Wetland Soils in Hammer, D. A. (ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan. p.41-72.
11. Phipps, R. G. and Crumpton, W. G. (1994) Factors affecting nitrogen loss in experimental wetlands with different hydrologic loads, *Ecol. Eng.* 3, 399-408.
12. Broadbent, F. E. and Clark, F. E. (1965) Denitrification, *Agronomy* 10, 344.
13. Zhu, T. and Sikora, F. J. (1994) Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands, In: Proc. 4th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control. Guangzhou, China, p.355-366.
14. Reilly, J. F., Horne, A. J. and Miller, C. D. (2000) Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge, *Ecol. Eng.* 14, 33-47.
15. Watson, J. T. and Hobson, J. A. (1988) Hydraulic design considerations and control structures for constructed wetlands for wastewater treatment, In: Hammer, D. A. Editor, 1988, *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial, and Agricultural* Lewis, Chelsea, MI, p.379-392.
16. Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (1993) *Wetlands*, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold (now J. Wiley & Sons), New York.
17. Brodrick, S. J., Cullen, P. and Maher, W. (1988) Denitrification in a natural wetland receiving secondary

- treated effluent. *Water Res.* 22, 431-439.
18. US Environmental Protection Agency. (1975) Process Design Manual for Nitrogen Control. October 1975.
19. Yang, H. M. (1992) Ecological Design of Estuarine Environment for a Sustainable Urban Ecosystem, PhD Dissertation, University of California Berkeley.
-